

表面被覆された鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する実験的研究

Experimental study on the durability of the reinforced concrete members covered with surface lining

大西弘志*, 守屋裕兄**, 梅原由紀夫***, 松井繁之****

Hiroshi Onishi, Hiroshige Moriya, Yukio Umehara, Shigeyuki Matsui

*工修, 大阪大学大学院助手, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**工修, ㈱奥村組, 関西支社土木部リフォーム課 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

***工修, 大阪市, 建設局土木部交通安全施設課 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北 1 丁目 14-16 大阪 WTC ビル 12 階)

****工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

In general, reinforced concrete structures are deteriorated with the many mechanical and chemical factors in its service period. Specially, the peeling of the concrete pieces from reinforced concrete becomes one of the most emergency problems of deterioration of reinforced concrete in these days. The one of the popular counter measures to prevent the falling of concrete pieces is the arrangement of lining on the surface of reinforced concrete members. In this method, many materials as FRP, polymers, mortar and so on are used.

Recently, the lining method is also used in the repair of concrete structures. However, the durability of lining is not clear in this case. Then the authors carried out some experiments and the discussions about the durability of lining as the repair method.

Key Words: surface coating, reinforced concrete member, environmental accelerating test, urea-urethane resin

キーワード: 表面被覆, 鉄筋コンクリート部材, 環境促進実験, ウレアウレタン樹脂

1. はじめに

土木構造物は供用期間中にその存在する環境に起因する多くの要因により影響を受ける。そして、多くの場合、構造物はその要因の影響に耐えつつ、供用期間中は健全であり続けることが期待されている。しかしながら、現実には多くの構造物において劣化が進行し、一部の構造物では深刻な問題となっている。

特に、近年は鉄筋コンクリート構造において、コンクリート内に配置された鉄筋の腐食に伴うコンクリート片の剥離・落下事例が多く認められるようになってきている。このような事例は構造物の耐久性にとって好ましくない影響をもたらすばかりか、構造物周辺の第三者に対して被害を与える恐れがあるため、早急に対策を行う必要があると認識されている。現在、既存の鉄筋コンクリート構造物のコンクリート片剥落を防止するための対策として、コンクリート表面にライニングを施すことによって、コンクリート片の剥離が発生しても、ライニングと周辺の健全な部分のコンクリートによってコンクリート片の重量を支え、その落下を防止するという方法が多く用いられている。

このような方法を採用する場合、ライニングに用いる材料としては炭素繊維やアラミド繊維、ガラス繊維などを用いた繊維補強プラスチックやエポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂などの高分子材料、樹脂モルタルなど多様な材料の

使用が考えられている。

しかしながら、元来、鉄筋コンクリート構造物は耐久性が高いといわれていることもあって、表面にライニングなどの被覆保護工を施さないのが一般的であった。このため、鉄筋コンクリート構造物にライニングを施した場合、特にいったん劣化・損傷が発生したときの補修を目的としてライニングを配置した場合にどれだけの耐久性があるのか明らかにされているとはいえないのが現状である。

そこで、本研究では特に最近ライニング用の新素材として注目されている 2 種類のウレア系樹脂 (ポリウレア樹脂、ウレアウレタン樹脂) に着目した実験を実施し、鉄筋コンクリート表面に施されたライニングの耐久性を評価することを試みた。

2. 実験の概要

本研究では、鉄筋に腐食損傷を受けた鉄筋コンクリート部材の補修にライニングを使用した場合のライニングの耐久性を評価するため、損傷を補修した部材を想定した供試体を用意し、それに対して外的要因・内的要因を加えることにより耐久性を評価することにした。

以下に本研究の実験で使用したライニング材の種類と鉄筋コンクリート部材モデル、実験手法の概要について述べる。

2. 1. ライニング材

今回の実験では一般的にコンクリートのライニングに用いられる素材として、エポキシ樹脂、ガラスクロス FRP (GFRP)、ビニルエステル、ポリマーセメントモルタル (PCM) を用意し、さらに、新素材として最近注目されているウレアウレタン樹脂、ポリウレア樹脂を用意した。以下にそれぞれの素材に関する主な特徴とライニングにした時の構成について述べることにする。

(1) エポキシ樹脂

硬化前のエポキシ樹脂は、比較的低分子量のオリゴマー混合物であるため、粘度が低く液状または粘性液状で使うことができる。これに硬化剤を加えると、硬化剤がエポキシ基と反応して高分子を生成する。硬化剤の選択により得られる硬化物の特性が異なるので、用途に合わせて多くの種類のものがある。接着強度に優れ、耐アルカリ、耐水性も高くライニング材料として多く利用されている。本研究で用いるエポキシ樹脂主材の物性を表-1 に示す。

エポキシ樹脂ライニングは、被覆する部材に、エポキシ系プライマーを塗布し、主材のエポキシ樹脂を3層に分けて塗り、その上にアクリルウレタン樹脂のトップコートを配置するという5層の構成になっている。

表-1 エポキシ樹脂の物性

引張強度 (MPa)	1.5以上
伸び率 (%)	100以上
硬度	40以上

(2) ガラスクロス FRP (GFRP)

GFRP とは、ガラス繊維でできた布にエポキシ樹脂を含浸させることにより作成される繊維補強プラスチック (FRP) である。ガラスクロス材料であるガラスファイバーは、ガラスの持つ透明性・耐薬品性・絶縁性・不燃性を備え、その上で柔軟性・高強度・良好な加工性を有する。ガラスクロスの特長には、①樹脂との接着性、②寸法安定性、③取扱性、④高い比強度、⑤腐食をしないこと、等がある。本研究で用いるガラスクロスの物性を表-2 に示す。

GFRP によるライニングは、被覆する母材の表面に、エポキシ系プライマーを塗布し、その上にエポキシ系タックコート (下塗り)、ガラスクロス、クロス押え (エポキシ系)、エポキシ系中塗り、トップコート (アクリルウレタン樹脂) という6層で構成されている。プライマー、主材、トップコートは上記(1)のエポキシ樹脂ライニングで使ったものと同じものを使用した。

表-2 ガラスクロス FRP の物性

厚さ (mm)	0.25
質量 (g/m ²)	203
密度 (本/25mm)	19×18
引張強度 (N/25mm)	300

(3) ビニルエステル FRP

ビニルエステル FRP とは、ビニルエステル樹脂をガラスフレークで補強した FRP である。ビニルエステル樹脂は、ビスフェノール系とノボラック系の2つに大別されるが、本研究では耐食性の高いビスフェノール系ビニルエステル樹脂を用いる。本研究で用いるビニルエステル樹脂の物性を表-3 に示す。

ビニルエステル FRP ライニングは、プライマー、FRP 中間層、FRP 表層、トップコートという4層で形成される。

表-3 ビニルエステル FRP の物性

引張強度 (MPa)	80~180
弾性率 (MPa)	40~110
線膨張係数 (10 ⁶ /°C)	2.3

(4) ポリマーセメントモルタル (PCM)

PCM とは、硬化前のセメントモルタルにポリマーエマルジョンを添加し、セメントの水和反応によって硬化させたものである。添加されたポリマーエマルジョンは、モルタル硬化後にポリマー粒子がセメント結晶の空隙に介在することによりモルタルの性状改良に寄与する。この材料の特長としては、①既存の躯体との接着性、②施工性、③低透水性、④低コスト、等が挙げられる。

本研究で用いる PCM ライニングは、ポリマーエマルジョンとしてアクリルエマルジョンを使用し、セメントには珪砂を加えたものである。実際の施工時には清掃等の下地処理を行った後、PCM を直接施工するため、樹脂系ライニングと異なり一層のみの構造となっている。

(5) ウレアウレタン樹脂

ポリウレアウレタン樹脂とは、1級アミンもしくは2級アミンを持つ化合物およびポリエーテルポリオールとの混合物とイソシアネート類との反応により生成するウレア結合とウレタン結合を併せ持ったポリマーのことである。この樹脂は反応速度が速く、1~10分で見掛け硬化し、30分程度でゴム弾性の発現が始まり、3時間程度でクラックや下地の変位に十分追従できる高弾性エラストマーとなる。また、溶剤や可塑剤を含まないため、施工時の環境に与える影響や経時的な性能低下が少なく、長期間安定した性能を維持し、エポキシ樹脂系と同程度の耐酸性、耐アルカリ性を有している。本研究で用いるウレアウレタン樹脂主材の物性を表-4 に示す。

ウレアウレタン樹脂ライニングは母材の上に、①プライマー (ウレタン系)、②主材 (ウレアウレタン樹脂)、③トップコート (アクリルウレタン樹脂) という3層で構成される。今回の実験では主材の施工厚を2mmとした。

(6) ポリウレア樹脂

ポリウレア樹脂とは、1級アミンもしくは2級アミンを持つ化合物と、イソシアネート類との反応により生成するウレア結合を有するポリマーのことで、反応速度が非常に

速く、2〜30秒で硬化する。一般的にはウレタン樹脂系に比べて伸びは小さいが、クラックや下地の変位などに十分に追従できる。また、溶剤や可塑剤を含まないため、施工時の環境に与える影響や経時的な性能低下が少なく、長期間安定した性能を維持し、エポキシ樹脂系と同等程度の耐酸性、耐アルカリ性を有している。本研究で用いたポリウレタ樹脂の物性を表-5に示す。

ポリウレタ樹脂ライニングは、被覆する母材の上に、プライマー（ウレタン系）、主材（ポリウレタ樹脂）、トップコート（アクリルウレタン樹脂）の3層で構成される。今回の実験では主材の施工厚を2mmとした。プライマーとトップコートはウレタウレタン樹脂ライニングと同じものを使用した。

2. 2. 鉄筋コンクリート供試体

本研究では、実構造物のコンクリート部材を想定した供試体として、図-1に示す鉄筋コンクリート供試体を用意した。この供試体は、100×100×300mmの直方体で、直径13mm、長さ210mmの異形鉄筋を、打設面から20mmの位置に埋設している。鉄筋には、後述する鉄筋電食試験および自然電位測定を行うため、リード線を接続した。今回の実験では、打設面を鉄筋腐食によるひび割れを生じさせる劣化対象面とし劣化面以外の側面にひび割れが生じないように補強筋を設置した。補強筋にはSBR（スチレンブタジエンゴム）により防食処理した溶接金網（φ3.2mm、50mmピッチ）を折り曲げて設置した。鉄筋はこの補強筋に固定した塩化ビニル製の棒（φ5mm）

表-4 ウレタウレタン樹脂の物性

引張強度 (MPa)	12.0
伸び率 (%)	427
引裂強度 (N/mm)	57.6
硬度	83

表-5 ポリウレタ樹脂の物性

引張強度 (MPa)	8.7
伸び率 (%)	179
引裂強度 (N/mm)	54.3
硬度	94

に結びつけることで、コンクリート打設時に型枠底部へ移動しないようにしている。今回の供試体に用いたコンクリートの配合を表-6に示す。

2. 3. 初期損傷付与方法および補修方法

本研究では2. 1. で挙げた各種ライニングにとって、最も不利となる状況として、いったん損傷を受けた鉄筋コンクリート部材に補修を施した場合、特に、補修したにもかかわらずライニング施工面以外からの腐食要因の進入に伴う内部鉄筋の再腐食が発生した場合を考えている。そこで、このような状況に試験条件を適合させるために、図-1に示す供試体のコンクリートを打設・28日間気中養生した後、供試体に強制的に損傷を与え、補修を施すことにした。以下に供試体への初期損傷の付与方法とその補修の方法について述べることにする。

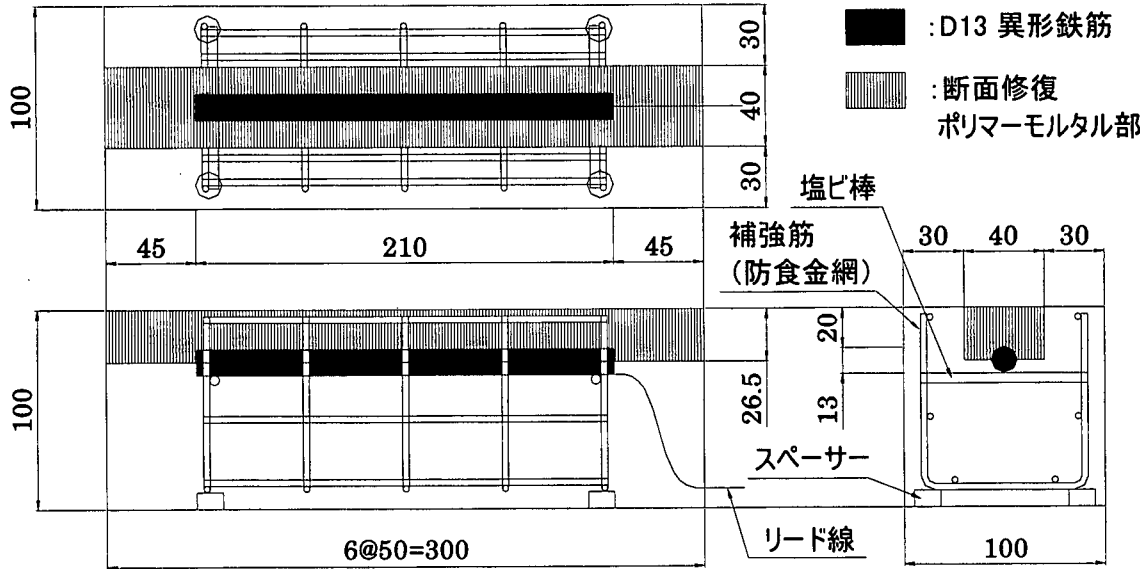


図-1 鉄筋コンクリート供試体

表-6 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)					圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
20	11.0	4.0	47	42	175	373	709	983	0.746	36.4	2.34

※圧縮強度・引張強度は28日強度を表示

(1) 初期損傷付与方法

今回の実験では供試体に対して、鉄筋電食試験の手法により、鉄筋に強制的に腐食を発生させ、初期損傷を与えることにした。このときの試験概要を図-2に示す。供試体の劣化対象面（かぶり 20mm）にプラスチック製の面木を接着剤で貼付し、次に劣化対象面上に塩水（濃度 5%）を流し込み、そこに直流電源の一端子につないだステンレス網（陰極）を沈め、+端子につないだ内部鉄筋と電氣的に接続する。直流電源により通電を開始し、約 2 週間（300 時間）通電を続けた。塩水は、塩化物イオンの移動や水分の蒸発による濃度の変化を考慮して、毎日入れ替えを行った。また、通電は複数の RC 供試体を並列に接続し、一体あたりの電流量が $1\text{A}/\text{m}^2$ になるように調整しながら実施した。

なお、今回の実験では初期損傷を与えるにあたり、自然電位を適宜測定して通電開始後 170 時間後には全ての供試体で腐食が発生しているのを確認するとともに、全数の供試体で劣化対象面にひび割れ損傷が発生しているのを確認している。

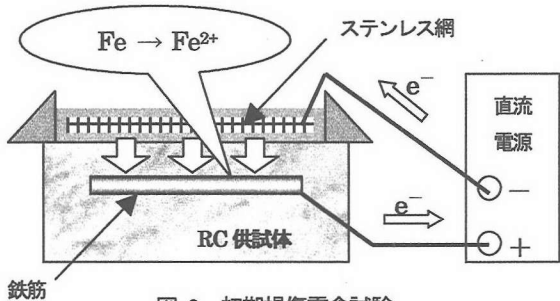


図-2 初期損傷電食試験

(2) 補修（断面修復）の方法

(1) で述べた手法により初期損傷を与えられた供試体に対し、本研究では以下の手順で補修を行った。

①コンクリート損傷部の除去：まず、鉄筋の腐食により損傷を生じた部分のコンクリートを除去することにした。除去するコンクリートの部分は、供試体中央の幅 40mm、深さ 26.5mm の矩形型の部分（図-1 参照）で、除去部分の側面はカッターにより切断、その後電動ドリルでコ

ンクリートをはつり、腐食した鉄筋を露出させた。

②腐食鉄筋の防錆処理：露出させた腐食鉄筋上半分の表面の腐食生成物を真鍮ブラシにより除去し、表面を清掃後、再腐食防止のための防錆剤を塗布した。

③PCM による断面修復：防錆処理後一定時間養生してから、鉄筋表面とコンクリート除去部の側面にエポキシ系接着剤を塗布し、さらに一定時間養生した後、コンクリートを除去した部分に PCM を充填した。ただし、断面修復に用いる PCM はライニングで用いられる PCM と物性が異なるものである。

④ライニング工の施工：損傷部分への PCM の充填後、一定時間の養生を経た後、劣化対象面の表面をケレンして供試体表面の調整を行った後、各種ライニングを施工した。ライニングの施工自体はそれぞれの工法に合わせて行うこととし、養生時間や施工期間などの条件を合わせるという操作はしなかった。

2. 4. 環境促進試験方法

本研究では、材料の劣化状況をよりの確に把握するために、以下に示す各種の試験のうち、塩分による促進試験（S 試験）と複合環境試験（U+S 試験、U+T 試験）を実施することにした。各試験の概要は以下のとおりである。

(1) 紫外線照射による促進試験（以下、U 試験と表記）

コンクリート構造物の表面に施工される樹脂ライニング工のように、屋外で使用される高分子材料が劣化する主要因の一つに太陽光に代表される光による劣化がある¹⁾。

本研究では、このような光劣化を再現するために、スガ試験機製サンシャインウェザーメーター、WEL-SUN-DC を用意した。この試験機は、カーボンアーク灯式耐候性試験機であり、カーボンを燃焼させることにより太陽光を想定したカーボンアークを放射する。その放射光の波長分布は太陽光とはやや異なり、必ずしも自然暴露によって行われた実験の場合と全く同等であるとは言えないものの、放射エネルギーについては $285 \pm 50\text{W}/\text{m}^2$ と、太陽光に近い値を実現している。アーク灯は、試験槽内中央に位置し、連続点灯のみならず、周期的に点灯・消灯を繰り返すこと

表-7 紫外線照射による促進試験 設定条件

状態	ブラックパネル温度	試験槽温度	湿球温度	湿度	時間
カーボンアーク照射	63℃	50℃	31℃	50%	60分
暗黒降雨	—	42℃	30℃	98%	30分
1サイクル所要時間					1時間30分

表-8 温度繰り返しによる促進試験 設定条件

状態	温度	湿度	時間
高温保持	60℃	60%	1時間15分
移行	↓		45分
低温保持	5℃		1時間15分
移行	↓		45分
(次サイクル)	(60℃)		(1時間15分)
1サイクル所要時間			4時間

表-9 塩分による促進試験 設定条件

状態	温度	湿度	塩水濃度	時間
塩水噴霧	35℃	98%	5%	4時間
乾燥	60℃	—	—	2時間
湿潤	50℃	—	—	2時間
1サイクル所要時間				8時間以上

* 各ステップ間の移行時間は含まれていない

ができる。また、消灯中には槽内の相対湿度を 95%以上に保持し、背面から降雨スプレーにより供試体に冷水を噴霧することができ、その表面に結露させることも可能である。なおこれは、JIS B 7753²⁾にも準拠している。

今回の実験では、紫外線照射（供試体の乾燥）と暗転・結露（供試体の冷却）という繰返し運転（デューサイクル試験）を行うこととした。温度・湿度・時間の設定条件については、供試体にとって最も過酷なものとなるように設定した。これを表-7に示す。

(2) 温度繰返しによる促進試験（以下、T試験と表記）

樹脂材料が受ける劣化には、前項で述べた光による劣化以外に熱による劣化がある³⁾。熱による劣化とは酸素の存在下で長時間ある温度に保持されたときに、高分子の自動酸化反応が進行することによる材料の変化である。物質は熱により膨張するが、塗膜と被塗物であるコンクリートの線膨張係数は異なるため膨張による応力と付着力のバランスが崩れ層間剥離などの問題が懸念される。

本研究では、太陽の熱の繰返しを人工的に再現して供試体に加えるための装置として、タバイエスベック製、恒温恒湿機 PR-4FP を用いた。この装置は温度 -20~100℃、湿度 0~98%、二酸化炭素濃度 0~20%の範囲内において試験槽内の環境を制御できる。槽内容量は 100×100×80cm と大型であり、網棚を利用することによって、一度に数種の供試体を配置できる。この装置を用いることによって、条件を数種設定して繰返し運転を行うことも可能である。本研究で使用したこの装置の設定条件を表-8に示す。

(3) 塩分による促進試験（以下、S試験と表記）

海岸部のコンクリート構造物は、他の地域に比べ塩分の影響を大きく受け、鉄筋腐食に至る劣化現象の発生が多い。特に、干満部や飛沫部といわれる部分ではコンクリートへの塩分の浸透が大きいと言われる。

本研究では、このような地域の環境を再現するためにスガ試験機製、塩乾湿複合サイクル試験機 ISO-3-CY-R を用意した。この試験機は、一定時間に一定量・一定濃度の塩水を噴霧することができ、さらに、乾燥状態、湿潤状態の保持も可能である。塩水噴霧量は、1~2ml/80cm²/h の性能を保有し、噴霧中は試験槽内を温度 35℃±1℃、湿度 98%RH 以上の状態に保持できる。また乾燥状態においては、70℃まで、湿潤状態においては、98%RH で 50℃まで調整可能である。塩水噴霧の方式は、精密ノズルを使用した、均一粒子噴霧均等分布方式であり、試験槽内の全供試体に均等に塩水を噴霧するので同一条件で試験を行うことができる。試験槽は、内外とも硬質塩化ビニル製で、二重層である。また、外装底部の水槽より発生する蒸気で、内槽をむらなく加熱する間接加熱方式のため、内部の温度は±1℃の均一分布が保たれ、空気加熱式に比べよい精度を実現することが可能である。槽内寸法は 90×60×50cm となっており、試験槽は上蓋とウォータースीलによって密閉される。これは、JIS Z 2371 にも準拠している³⁾。

この装置の設定条件を表-9に示す。この設定条件は

NS サイクルと呼ばれ、日産自動車（株）において社内規格試験としてよく使用されているもので、促進率がその他の設定条件に比べて非常に高いことが知られている⁴⁾。

(4) 複合環境試験

本研究では、環境劣化がさまざまな劣化要因の複合作用で生じることに着目し、上述の促進試験環境を交互に供試体に作用させる環境促進試験を行うことで、複合環境による促進を行い、より実環境に近い劣化現象を再現することにした。本研究では再現する環境として以下の2種類の環境を考え、供試体に与えることにした。なお、これらの複合試験においては要素として用いられた試験の略称を組み合わせた名称を用いることにした。

① U+S 試験

この試験は光劣化による影響と、塩分浸透による影響を調査できる複合環境促進試験である。紫外線により光劣化が進むにつれ、樹脂の塩分遮蔽性は低下すると予想されるため、この試験法を用いることで、RC 構造物の防食にとって重要な塩分の遮蔽性の経時劣化を調査することができ、想定する実環境は、海岸域や海洋域のような塩分の影響の強い環境下に建設された橋梁等の構造物である。

② U+T 試験

この試験は光劣化による影響と、熱劣化による影響を調査できる複合環境促進試験である。紫外線により光劣化が進むのと同時に熱劣化も進み、樹脂の劣化という意味では最も過酷な環境であると言える。想定する実環境は、内陸部の山間部のような日射の影響の強い環境下に建設された橋梁等の構造物である。

ところで、これまでに述べた環境促進試験の管理には、表-10に示す「SET 数」を用いることにした。例えば、「U+S 試験で 1.5SET 終了時」とは、「U 試験×100cycle → S 試験×20cycle → U 試験×100cycle」という意味である。本研究では各試験を最大 6SET 行うことにして実験を実施した。

表-10 1SET の定義

試験名	1SET のサイクル数	1SET の時間
U 試験	100 cycle	6 日 6 時間以上
T 試験	50 cycle	8 日 8 時間
S 試験	20 cycle	7 日前後
U+T 試験	U 試験 × 100 cycle → T 試験 × 50 cycle	
U+S 試験	U 試験 × 100 cycle → S 試験 × 20 cycle	

2. 5. 鉄筋電食試験方法

ライニングを施された RC 部材中の鉄筋に腐食が発生した時の耐久性を評価するために、一部の供試体で鉄筋電食試験を行った。供試体の劣化対象面に施したライニング工の材料の多くは絶縁体であるので、初期電食試験のときのように劣化対象面に直接塩水プールを設けても電流が流れない可能性が高く、当初の目的に達することができな

いと考えられる。そこで、本研究では劣化対象面の反対側のライニング工を除去し、その面に電極を設けることで通電を行うことにした。塩水は、塩化物イオンの移動や水分の蒸発による濃度の変化を考慮して、毎日入れ替えを行った。試験概要を図-3に示す。この試験では、初期損傷電食試験の約2倍の時間(約600時間、約4週間)の通電を行った。ただし、初期電食のときと異なり供試体の電気抵抗にばらつきがあったため、各供試体と電源装置の間に可変電気抵抗(0~2500Ω)を据え付け、定電圧通電で日々 $1A/m^2$ となるように制御した。

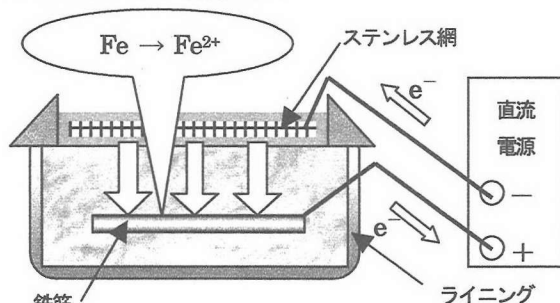


図-3 耐久性評価電食試験

2. 6. 性能評価試験

本研究では2.3.~2.5. で述べた手法を用いて供試体に損傷を与え、主に外観調査(デジタルカメラによる記録+C CDカメラによる詳細調査)により供試体の状況を把握し、評価を行うことにしたが、一部の供試体ではさらにいくつかの試験を行い、残存性能の把握を試みることにした。以下に今回実施した試験について説明を加えることにする。

(1) ピーリング(剥離接着)試験

環境促進試験の所定のサイクルを終了したウレアライニングを施したRC供試体のうち、供試体全体としての劣化状況が軽微な場合、ピーリング試験を行い、ピーリング強度の劣化特性を調査することにした。ピーリング強度とは剥離接着強度のことで、接着層を引き剥がしていくときの平均接着力を単位幅あたりで求めるものである。本研究では、図-4に概略図を示す90度ピーリング試験をJIS K 6854-1⁵⁾に従って行うことにした。

ただし、JISの標準試験法では、引き剥がし角度を厳密に90°にできないため、引き剥がし角度を管理するためにローラー式ピーリング治具を用意した。試験環境は、[温度 $23\pm2^{\circ}C$ 及び相対湿度($50\pm5\%$)]とした。

ピーリング箇所は、図-5に示すように、RC供試体の劣化対象面のうち、コンクリート、断面修復PCMの表面の計3箇所に対して行った。ピーリングする箇所の寸法は幅25mm、長さ200mmで、そのうち端部から50mmを試験時のつかみ部として、あらかじめ引き剥がしておいた。残りの150mmのうち中央の約100mmの部分でピーリング強度を求めるが、この区間で見られるピーリング力の平均値をグラフより求めることで強度の決定を行った。

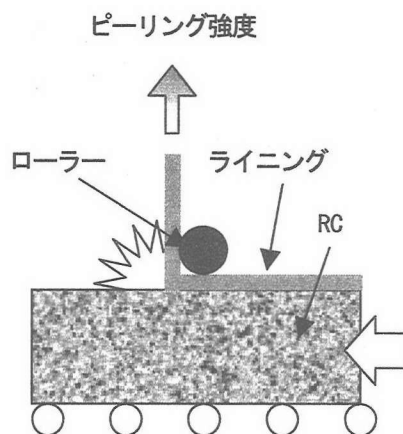


図-4 ピーリング試験概要

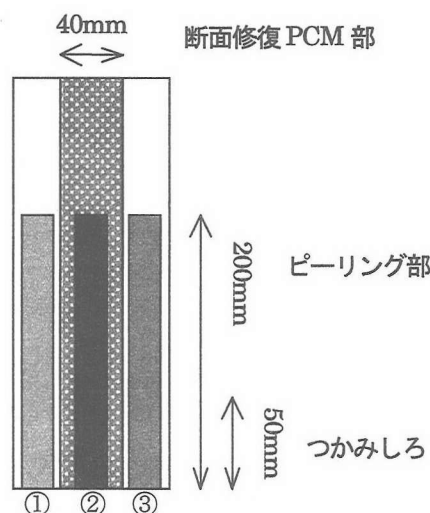


図-5 ピーリング箇所

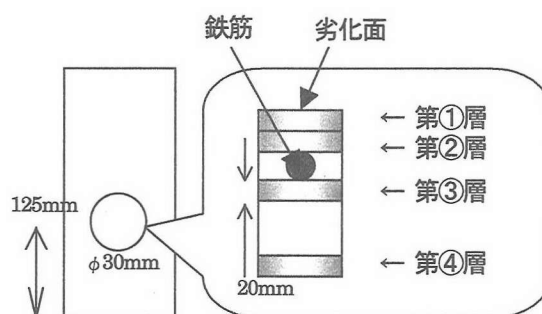


図-6 塩分量調査コア

(2) 塩分浸透量調査

ライニング工に要求される性能として、コンクリート内部の鉄筋を腐食させる劣化因子に対する遮蔽性が挙げられる。鉄筋腐食を対象としたとき、遮蔽すべき劣化因子には、主要因子として水・酸素、および鉄筋の腐食を加速させる因子として塩分・炭酸ガスがある。特に塩分は、鉄筋周辺にある濃度を超過して存在すると、コンクリート中で安定状態にあった鉄筋を腐食させる。一般に、ライニング

材の塩分遮蔽性は、経時的な劣化により低下していくと思われる。

本研究では、紫外線による光劣化と塩分浸透作用を同時に受ける U+S 試験を 6SET (U 試験×600cycle, S 試験×120cycle) 完了した供試体に対し、塩分浸透量の調査を行い、塩分遮蔽性について確認することにした。対象とするのは、以下の 3 つの供試体である。

- ①ウレアウレタン樹脂ライニング補修 RC 供試体,
(U+S 試験 6SET)
- ②ポリウレア樹脂ライニング補修 RC 供試体
(U+S 試験 6SET)
- ③断面修復 RC 供試体 (ライニング無し)
(U+S 試験 6SET)

また、環境促進による影響を確認するため、断面修復 RC 供試体 (ライニング無し) で、環境促進を受けていないものについても調査を行った。

これらの供試体の塩分浸透量の比較を行うことで、ウレア系ライニング材がどの程度塩分遮蔽性を維持しているかを調査する。

塩分浸透量調査の方法は、JCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」によって行った。測定箇所を図-6に示すように、一供試体につき4層(1層10mm)で、コア抜き時に補強筋を含まない位置とした。

3. 実験結果

3. 1. 外観調査結果

(1) 初期損傷付与試験時の状況

ライニング工のない健全な基本 RC 供試体に関しては、通電時間が約 170 時間を経過するまでには、ほとんどの供試体でおおよそ鉄筋直上付近に長軸方向のひび割れが同程度に発生した。本研究のように劣化対象面を常に塩水による湿润状態にしていると、ひび割れが発生しても酸化化合物が大量に湧き出ることが多く、ひび割れ幅の拡大はあまり進まない。これは、実構造物における塩害による劣化が錆汁の発生を伴うことが多く、錆が流れ出すことで鉄筋の腐食膨張がそれほど生じず、表面状態からは鉄筋腐食の程度がわかりにくいというケースと同様の現象であると思われる⁶⁾。断面修復時に劣化したコンクリートを除去し鉄筋を露出させて鉄筋の状況を確認したところ、所々に孔食状の断面欠損が見られた。

(2) 断面修復のみを施した供試体の電食試験時の状況

断面修復後にライニングを施さなかった RC 供試体では、通電開始後約 130 時間までには、コンクリートと断面修復 PCM の境界の一方からひび割れが発生した。その後、ひび割れは発生した境界上で端部まで進展するか(図-8(b),(c)参照)、PCM を横切ってもう一方の境界へひび割れが進展し、その後端部に至る(図-8(a)参照)という傾向が見られた。本研究で用いた形式の断面修復の場合、断面修復材と母材コンクリートの境界がひび割れ発生・進展に

おける弱点となると言える。通電時間が約 220 時間を超える頃には、ひび割れ幅が 0.2mm に達する供試体も現れた。また、ひび割れ部においては錆汁の流出が確認された。

ひび割れが供試体の端部にまで達した後、その付近で劣化対象面に段差ができ、断面修復 PCM 部が隆起する傾向が見られた。さらに、端部に達したひび割れは、供試体中央部に生じているひび割れよりもひび割れ幅が大きく、試験終了時には 2.0mm にも及ぶものも存在した。これは供試体の端部では中央部よりもひび割れ開口に対する拘束が小さいためであると考えられる。

(3) 初期損傷を与えずにライニングを施した供試体の電食試験時の状況

本研究では比較のために供試体に初期損傷を与えずにライニングを施した供試体についても電食試験を実施した。この試験ではライニング材料としてウレア系樹脂のみを採用して試験を行った。この試験において、ウレアウレタン樹脂、ポリウレア樹脂はともに高いひび割れ追従性を示し、約 600 時間の通電を完了した後も、ひび割れ発生にともなうライニング工の破損は見られなかった。ただし、ライニング工の下地のコンクリートにひび割れが発生しているため、表面にひび割れの形状が浮かび上がる様子が目視で確認できた。この表面形状を調査した結果、初期電食試験時と同様のひび割れが発生していると推定された。

また、ウレアウレタン樹脂ライニング、ポリウレア樹脂ライニングを施した供試体のうち各一体で、内部の錆汁の流出によると見られる著しいふくれが生じた。発生したのはほぼ同時で、通電約 370 時間が経過した時点である。ポリウレア樹脂ライニングに発生したふくれの方が面積は大きい、高さが低いものとなり、時間の経過とともに次第にしぶんでいき、最終的に目視で確認できなくなった。ウレアウレタン樹脂ライニングのふくれは面積が小さいものの、高さがあり、ふくれが小さくなった後も痕跡は消えなかった。この挙動の違いには後述するピーリング力とライニング材の物性の関係が大きく影響しているものと思われる。

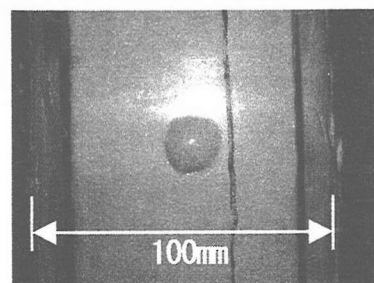


図-7 膨れ発生状況

(4) ライニング補修 RC 供試体

断面補修後にライニングを施した供試体に鉄筋電食試験を実施した供試体の観察結果についてその概要を以下に示す。

- ①ウレア系樹脂ライニング: 約 600 時間を完了した時点で、ひび割れの発生による損傷は見られなかった。ライニング表面の変形状況からひび割れの形を推定した結果、
- (2)の供試体と同様のひび割れが発生している可能性が強いことがわかった。環境促進試験 (U+S 試験) により負荷を与えたウレアウレタン樹脂ライニング補修

RC 供試体に関しても、これと同様の傾向を示した。下面にひび割れが発生していると推定されても全く損傷を生じなかったことから、このライニングは環境負荷を与えても十分なひび割れ追従性を保持していたと判断できる。環境促進を 4SET 行った供試体においては、ふくれが発生した。ふくれの高さはその径に対して大きく、(3) で確認されたものと同じと考えられるが、試験終了後もふくれが収縮することはなかった。

②エポキシ樹脂ライニング：薄膜型のライニングということもあり、ひび割れ発生後、かなり明瞭にひび割れの発生状況が観察でき、その後まもなくひび割れ上に損傷が発生した（通電開始後約 220 時間頃）。その後通電を続けると、(2) でみられたようなひび割れ部の段差発生・ひび割れ幅拡大により、著しい損傷が観察できた。端部以外の損傷では、錆汁の流出があるものの、大きな損傷の進展は見られなかった。

③ビニルエステル FRP ライニング：ひび割れ追従性のほとんど期待できない材質のため、早期に損傷（ひび割れ）が発生した（通電開始後約 200 時間未満）。ひび割れ長さは発生当初より約 200mm と大きく、今回の実験では最も機能の喪失が著しいと判断できる。また、ひび割れ部からは錆汁が流出した。

④PCM ライニング：ビニルエステル FRP ライニング工と同様、ひび割れ追従性のほとんど期待できない材質のため、早期に損傷（ひび割れ）が発生した。ひび割れ長さは発生から徐々に増大していった。このライニングでもひび割れ部から錆汁が流出した。

(5) 環境促進試験時の供試体外観調査結果

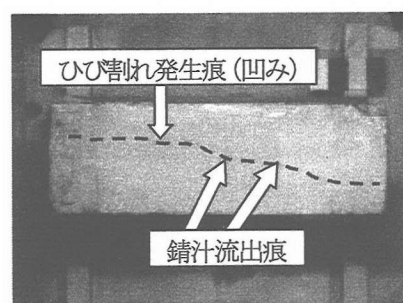
①全般的な傾向：表面的な劣化の様子が一部の供試体で見受けられるものの、ライニングを施した全ての供試体において、内部からの劣化は確認できなかった。このことから今回の試験対象のライニングは外部からの環境負荷に対して高い耐久性を示したと言える。断面修復後ライニングを施さなかった供試体では、U+T 試験の供試体でひび割れの発生が確認できた。

② U 試験における傾向：ビニルエステル FRP を除く、全てのライニングにおいて、U 試験 100cycle 終了後から白亜化の発生が認められた、その後も U 試験を続けると白亜化が確認できた。

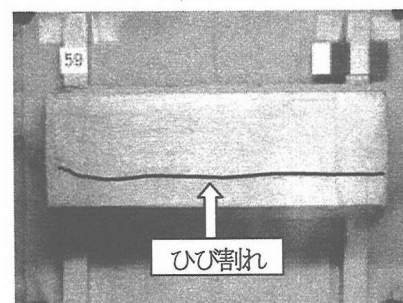
一部の供試体ではトップコートのはがれ、損耗による主材の露出が見られた。主材が露出した部分では、ウレアウレタン樹脂では著しい黄変と微細なひびわれ、ポリウレア樹脂では黄変と著しいひび割れが見られた。また、ポリウレア樹脂では、トップコートの損耗の進展とともに、表面に気泡が現れる傾向が見受けられた。

エポキシ樹脂ライニングを施した供試体では大きな劣化は見られなかった。これは、一部の供試体に対して U 試験機の冷水噴霧の不具合で劣化を十分に与えられなかったことが原因と考えられる。

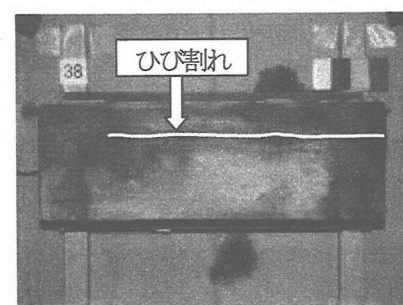
ビニルエステル FRP は試験開始直後から黄変が発生したが白亜化は見られなかった。



(a) エポキシ樹脂ライニング



(b) ビニルエステル FRP



(c) ポリマーセメントモルタル

図 - 8 鉄筋電食試験時の損傷

全ての供試体で、U+S 試験と U+T 試験との間に明瞭な差は認められなかった。

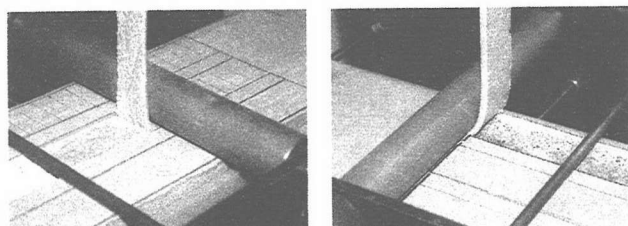
③ T 試験および S 試験における傾向：T 試験の影響および S 試験の影響は全ての供試体で見受けられなかった。S 試験のみの環境促進では光沢度の低下すら確認できなかったことから、S 試験に対してはどのライニングも高い耐久性を有していると言える。

3. 2. ピーリング試験結果

今回の試験ではライニングの曲げに対する性質を検討した結果、ピーリング試験が可能であろうと判断されたウレア系樹脂についてのみピーリング試験を実施した。今回のピーリング試験の試験状況を図 - 9、試験結果を図 - 10 に示す。環境劣化を施していないライニング工に対するピーリング強度に関しては、鋼板に施工された場合の値を参考値として示した。以下にこの試験で得られた結果を以下に示す。

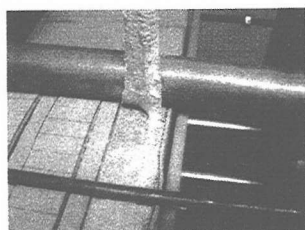
(1) 剥離部の観察結果

図 - 9 でも確認できるように、ウレアウレタン樹脂は、治具のローラーに沿わず、垂直に引張上げられピーリング



ウレアウレタン樹脂

ポリウレア樹脂



ウレアウレタン樹脂
(付着力が大きい部分)

が進む傾向が見られた。剥離部では、相対的に付着強度が大きい箇所と小さい箇所が存在することが確認できた。これは付着強度にばらつきがあることに起因するものと見られ、付着強度が大きい部分ではピーリングの進展が妨げられる。付着強度が大きい部分が破断すると一気にピーリングが進み、次の付着強度が大きい部位でピーリングの進行が止まるという傾向が見られた。付着強度が大きい部分の面積は様々で、ピーリング試験部の幅と比較して小さい場合、その部分で引っかかるようにピーリングが進み、つかみ部がねじれ、早期に破断するという現象も見られた。

ほとんどの供試体でピーリングがわずかしこに進まず、途中でつかみ部が破断した。ライニングが破断した場合は3回目まで測定し直し、最大値をウレアウレタン樹脂の試験値とした。これに対し、ポリウレア樹脂ライニングでは、均一に剥離する傾向にあったため、比較的容易に、平均ピーリング強度を得ることができた。

(2) ピーリング強度の比較

ピーリング強度の比較では、ウレアウレタン樹脂がポリウレア樹脂に比べ数倍の高い値を示し、界面の強度に関して両者の間に大きな差があることがわかった。この原因の一つには材料の柔軟性が考えられる。すなわち、ウレアウレタン樹脂は柔軟性が高く、ピーリング時にほぼ垂直に剥離するため、剥離部においては鉛直方向の引張力が主に働

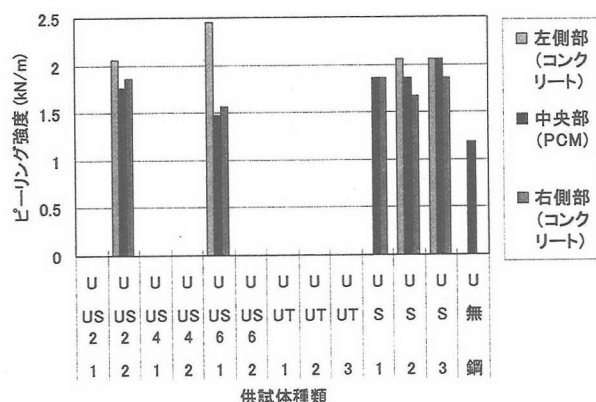
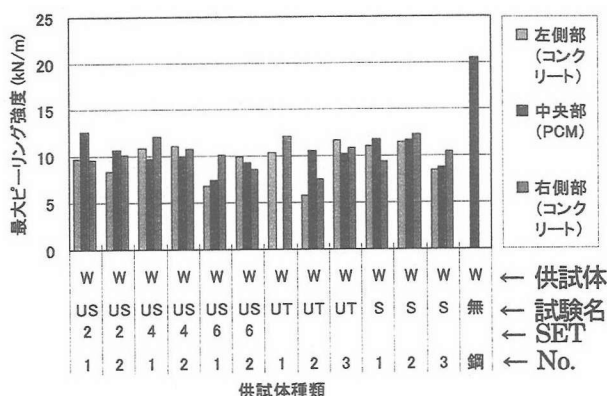


図 - 10 ピーリング試験結果

(W: ウレアウレタン樹脂, U: ポリウレア樹脂)

いていると考えられる。しかし、ポリウレア樹脂は柔軟性がウレアウレタン樹脂に比べて劣り、剥離部が厳密に垂直にならないため、剥離部は鉛直方向の引張力だけでなく水平方向のせん断力も働いていると考えられる。そのため、応力が複数方向に働くことから界面剥離が進展しやすいと考えられる。

(3) 環境試験別の強度比較

本研究ではS試験による変状は確認できていないため、S試験を基準としてU+S試験、U+T試験の比較を行った。ウレアウレタン樹脂に関する試験結果をみると、母材コンクリート部におけるピーリング強度に大きなばらつきがあり、計測値の傾向を見出すことは困難であった。それに対し、補修された部分であるPCM部におけるピーリング強度に着目すると、どの環境においても強度が低下する傾

表 - 11 塩分浸透量 (U+S 試験)

ライニング材		なし	なし	ウレアウレタン	ポリウレア
環境促進SET		なし	6SET	6SET	6SET
Cl ⁻ (%)	①	0.010	0.165	0.059	0.049
	②	0.006	0.153	0.064	0.043
	③	0.022	0.107	0.091	0.045
	④	0.018	0.110	0.056	0.014
Cl ⁻ (kg/m ³)	①	0.23	3.80	1.36	1.13
	②	0.14	3.52	1.47	0.99
	③	0.51	2.46	2.09	1.04
	④	0.41	2.53	1.29	0.32

※1 ①・②・③・④: 図 - 6 中に示したサンプル採取層

※2 Cl⁻の量は重量濃度 (上段、%) と単位体積重量 (下段、kg/m³) を併記した

向にあることがわかる。ポリウレア樹脂ではS試験後のピーリング強度の値はほぼ同じ水準にあるのに対し、U+S試験後のピーリング強度をみると、ウレアウレタンと同様の傾向を示していることがわかる。このような環境による強度の違いは通常の引張付着試験の結果からは確認が困難なことや、コンクリート片の剥落に対する抵抗挙動や、鉄筋電食試験で見られたような内部鉄筋腐食による断面修復部の隆起など、実構造物ではピーリング状に剥離が進展することが多いと考えられることから、今後は引張付着強度の結果よりも、ピーリング強度の結果を重視すべきであると考えられる。

3. 3. 塩分浸透量調査

今回実施した塩分浸透量調査の結果を表-11に示す。この試験結果を見るとウレア系樹脂の供試体ではライニングなしで環境促進した供試体の1/3程度に抑えられているが、環境促進なしの供試体の5倍の塩分濃度が検出されている。これに関しては塩分濃度の分布が表面から塩分が進入したと考えるには不自然である(ウレアウレタン樹脂では鉄筋付近で最大値を示している。など)ことから、今後、追加試験を行うことが必要であると考えられる。

4. 結論

以上のことから今回の研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 各種ライニングを施した供試体に対し様々な条件で電食試験を行った結果、従来のライニング材が破損したのに対し、ウレア系樹脂のライニングには損傷が確認できなかったことから、ウレア系樹脂は補修に利用するライニングとしては高い耐久性を有していると判断できる。

- 2) 環境促進試験のみを行った場合、ライニングをしなかった供試体では損傷が認められた場合でも、今回試験したどの供試体についても白亜化は認められたものの深刻な劣化・損傷は認められなかった。このことから、今回使用したライニングはどれも環境負荷に対しては十分な耐久性を有していると考えられる。
- 3) ピーリング試験を実施した結果、同じウレア系の樹脂でもウレアウレタン樹脂とポリウレア樹脂とでは剥離性状・強度に大きな差が認められた。このことから、今回のようにコンクリートの損傷部位を対象としてライニングの性能を調査する場合にはピーリング試験を行うのが適切であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：重防食塗装の実例，山海堂，1998
- 2) JIS：サンシャインカーボンアーク灯式耐候性試験機・解説，JIS B 7753，1988
- 3) JIS：塩水噴霧試験法，JIS Z 2371，1988
- 4) 神谷誠他：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，日本道路公団試験研究所報告，Vol.31，pp.65～97，1994
- 5) JIS：接着剤—はく離接着強さ試験方法—第1部：90度はく離，JIS K 6854-1，1999
- 6) 片脇清士：最新のコンクリート防食と補修技術，山海堂，1999-9

(2002年4月19日 受付)